

## Modelado numérico de la fisuración por corrosión de armaduras

F. J. Molina,  
E. Alarcón

Universidad Politécnica de Madrid  
E.T.S.I.I., Dep. Mecánica Estructural

### INTRODUCCION

La corrosión del acero es uno de los más importantes fenómenos que acortan la vida de una estructura de hormigón armado. La corrosión del acero reduce la resistencia y la adherencia de la armadura y, frecuentemente, aumenta su volumen, provocando la fisuración del hormigón que la rodea. La evolución y predicción de estos efectos es un problema difícil que envuelve aspectos químicos y mecánicos interactuantes. Este trabajo es un primer intento de simulación numérica de algunos de los aspectos mecánicos.

Considerando una barra de armadura, de sección circular (Fig. 1), la penetración de la corrosión en el acero será llamada "x" y se supondrá uniforme en la superficie de la barra. El objetivo del estudio será el establecimiento de la relación entre "x" y la evolución de la fisuración inducida en el hormigón, considerando "x" como una variable independiente.

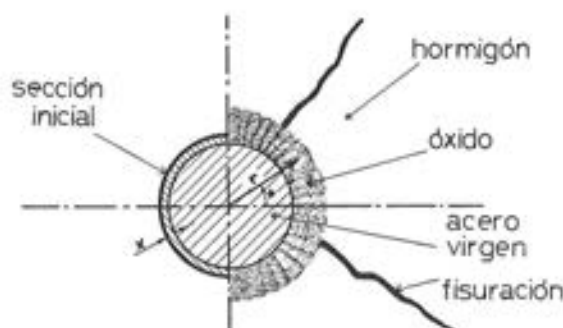


Fig. 1. Sección transversal de la barra corroída.

### MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

#### Simulación de la corrosión

Puesto que la corrosión no es un tipo de carga habitual en los programas de elementos finitos, se hace necesaria su inclusión de una manera especial. La corrosión de un elemento del modelo, se simulará mediante la superposición de dos efectos:

- una reducción de la rigidez,
- un aumento del volumen.

El primer efecto se puede conseguir mediante una variación de las propiedades del material (módulo de Young y coeficiente de Poisson), desde las correspondientes al acero hasta las correspondientes al óxido que, por simplicidad, se consideran iguales a las del agua líquida, es decir,

$$\nu = ,49999 \text{ (en lugar de } \nu = ,5) \quad (1)$$

para el coeficiente de Poisson y

$$E = 2(1 + \nu)(1 - 2\nu)K = ,1176 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

(en lugar de  $E = 0$ )

para el módulo de Young, para evitar inestabilidades numéricas y siendo

$$K = 1960 \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

el coeficiente de compresibilidad del agua.

Este cambio de propiedades se puede imponer por un incremento de temperatura, siempre que el programa de elementos finitos permita que las propiedades de los materiales varíen con la temperatura.

El segundo efecto se puede conseguir mediante una imposición simultánea de una deformación inicial sobre el elemento. Pero, si se supone que el volumen del óxido puede variar entre 2 y 10 veces el volumen inicial del acero

$$V_f/V_i = 2 \text{ a } 10 \quad (4)$$

no se puede seguir considerando que se trata de un problema de pequeñas deformaciones. En la teoría de pequeñas deformaciones, la deformación volumétrica impuesta a un fluido se mide por

$$\theta = \epsilon_{rr} + \epsilon_{\phi\phi} + \epsilon_{zz} \quad (5)$$

donde  $\epsilon_{rr}$ ,  $\epsilon_{\phi\phi}$  y  $\epsilon_{zz}$  son las componentes de la diagonal principal del tensor de deformación, en coordenadas cilíndricas; pero la verdadera deformación volumétrica es

$$\epsilon_v = (1 + \epsilon_{rr})(1 + \epsilon_{\phi\phi})(1 + \epsilon_{zz}) - 1 = V_f/V_i - 1 \quad (6)$$

En problemas de grandes deformaciones, las entidades expresadas en las ecuaciones (5) y (6) serán distintas, en general; pero para este problema particular es posible hacer la hipótesis

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_{\phi\phi} = 0 \quad (7)$$

que a su vez implica que

$$\theta = \epsilon_v = \epsilon_{rr} \quad (8)$$

por lo que dichas entidades son iguales a la deformación radial. La hipótesis (7) es fácil de justificar si se dibuja el eje Z a lo largo del eje de la barra (Fig. 1) con lo que, suponiendo deformación plana,

$$\epsilon_{zz} = 0 \quad (9)$$

y, suponiendo una deformación despreciable en el acero virgen,

$$\epsilon_{\phi\phi} \approx u_r/r \ll \epsilon_{rr} \approx x/r \ll \epsilon_{rr} \quad (10)$$

donde  $r$  es la coordenada radial y  $u_r$  el desplazamiento asociado.

En consecuencia, el cambio de volumen puede ser impuesto mediante una dilatación térmica de valor

$$\alpha \Delta T = \theta/3 = \epsilon_v/3 = 1/3 (V_f/V_i - 1) \quad (11)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica y  $\Delta T$  el incremento de temperatura.

De este modo, los efectos mecánicos de la corrosión en un elemento, esto es, reducción de la rigidez e incremento del volumen, se pueden simular adecuadamente mediante una única carga térmica.

### Simulación de la fisuración

Existen dos grandes categorías de modelos de fisuración, desarrollados dentro del método de los elementos finitos. Son los modelos discretos y los modelos difusos. Los modelos de fisura difusa son especialmente fáciles de introducir en los programas de elementos finitos, ya que no requieren una redefinición de la malla conforme se propaga la fisuración y el significado de ésta es un simple cambio en la ley de comportamiento. Por otra parte, en las fisuras de modo I, los resultados que ofrecen ambos tipos de modelo son coincidentes [1]. Los autores han trabajado también en otras categorías de modelos [2], pero para este problema han adoptado el modelo de fisura difusa propuesto en [3], dada su gran utilidad. Puesto que se espera obtener predominantemente una fisuración de tipo I en este problema, cabe esperar una baja influencia del tipo de modelo de fisura elegido.

El modelo de fisura difusa [3] está basado en la Mecánica del Continuo y es muy similar al modelo elasto-plástico. Existe un criterio de fisuración que es el de la máxima tensión principal. Cuando se satisface dicho criterio, se crea una fisura en dirección normal a dicha tensión principal y se supone

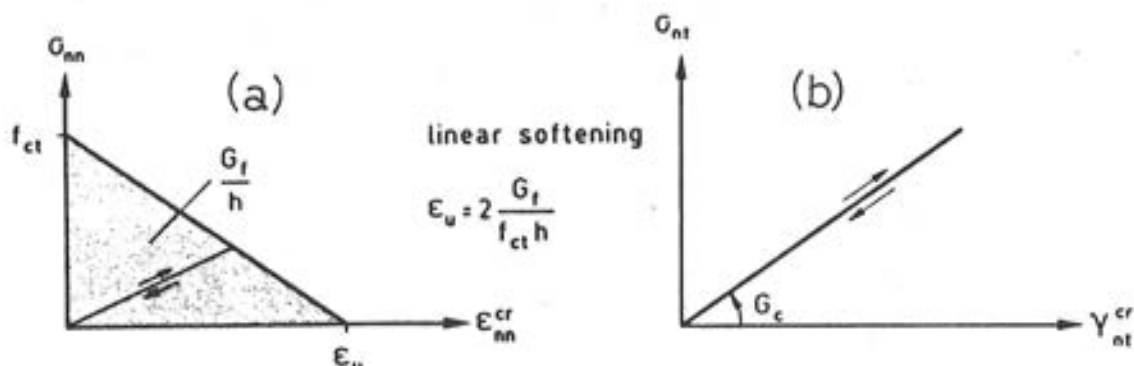


Fig. 2. Relación entre:  
(a) tracción normal y deformación normal de fisura.  
(Reproducida de [3]).

(b) tensión tangencial y deformación tangencial de fisura.

que el tensor de deformación se puede descomponer

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}^e + \tilde{\epsilon}^{cr} \quad (12)$$

donde  $\tilde{\epsilon}^e$  es la deformación elástica y  $\tilde{\epsilon}^{cr}$  la deformación de fisura. La relación entre el tensor de tensiones  $\tilde{\sigma}$  y  $\tilde{\epsilon}^e$  es elástica, lineal e isotrópica

$$\tilde{\sigma} = D^e \tilde{\epsilon}^e \quad (13)$$

mientras que la relación entre  $\tilde{\sigma}$  y  $\tilde{\epsilon}^{cr}$  es una ley de reblandecimiento ortótropa que depende de la historia de la fisura. En [3] se propone una ley diferencial

$$ds^{cr} = D^{cr} de^{cr} \quad (14)$$

donde  $s^{cr}$  son las componentes de  $\tilde{\sigma}$  en coordenadas locales de fisura,  $e^{cr}$  las componentes de  $\tilde{\epsilon}^{cr}$  en la misma referencia y  $D^{cr}$  una matriz diagonal. Los diagramas más sencillos de comportamiento, en direcciones normal y tangente a la fisura, para un problema plano son los que se reproducen en la Fig. 2.

El área del diagrama de la Fig. 2a es  $G_f/h$ , donde  $G_f$  es la energía de fractura del hormigón y  $h$  es el ancho de banda de fisura del modelo de elementos finitos. Esta dependencia entre la ley de comportamiento y el tamaño de la malla, fue sugerida en [4] para poder obtener unos resultados que fue-

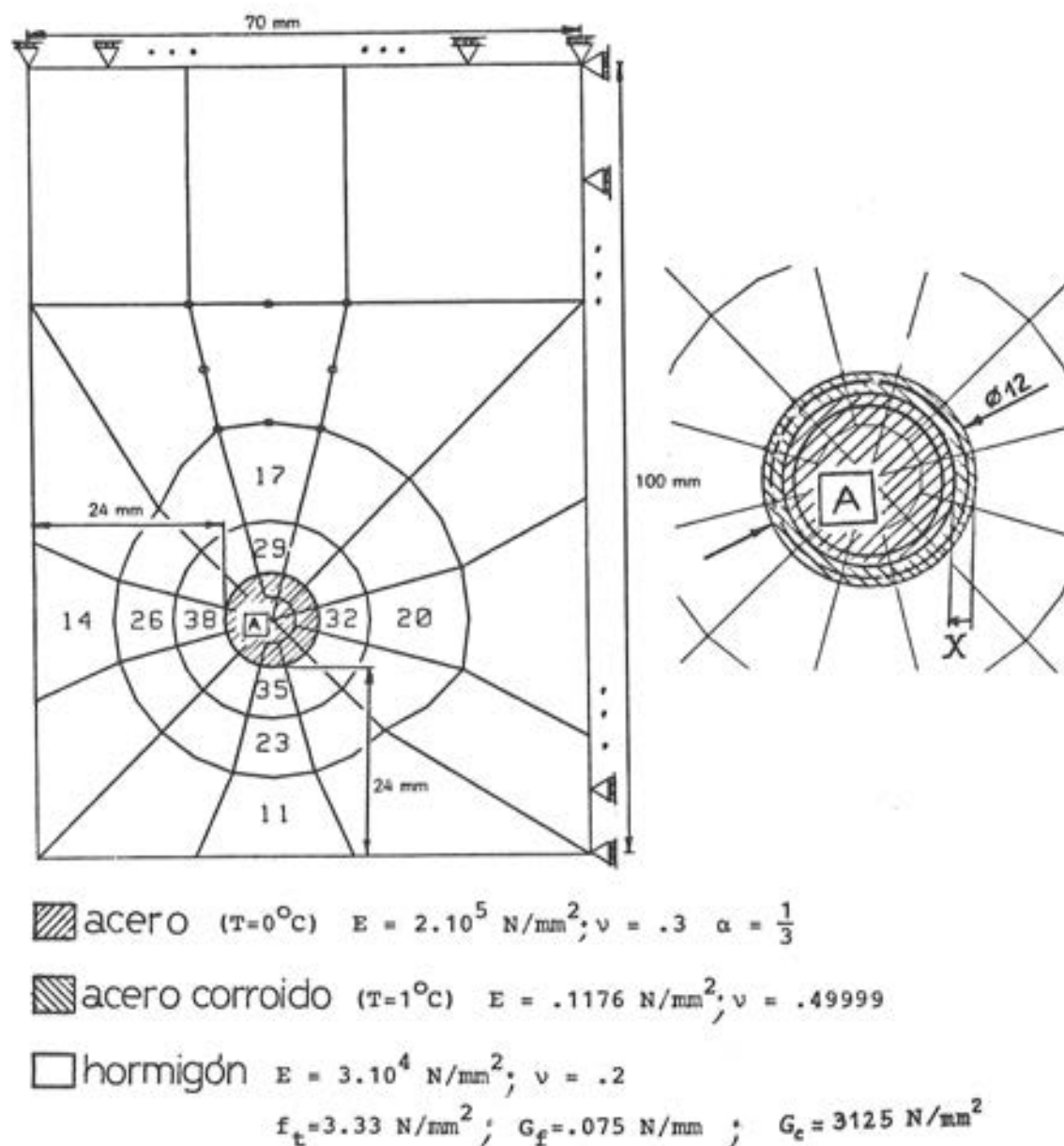


Fig. 3. Modelo de elementos finitos para el ejemplo, y propiedades de los materiales.

ran objetivos con respecto al refinamiento de la malla. Normalmente, en modelos planos, a  $h$  se le da el valor

$$h = \sqrt{A} \quad (15)$$

donde  $A$  es el área asociada al punto de integración.

De la misma manera que ocurre en el modelo elasto-plástico, se puede construir una relación tangente entre la tensión y la deformación total, en la forma

$$d\tilde{\sigma} = D^{etr} d\tilde{\epsilon} \quad (16)$$

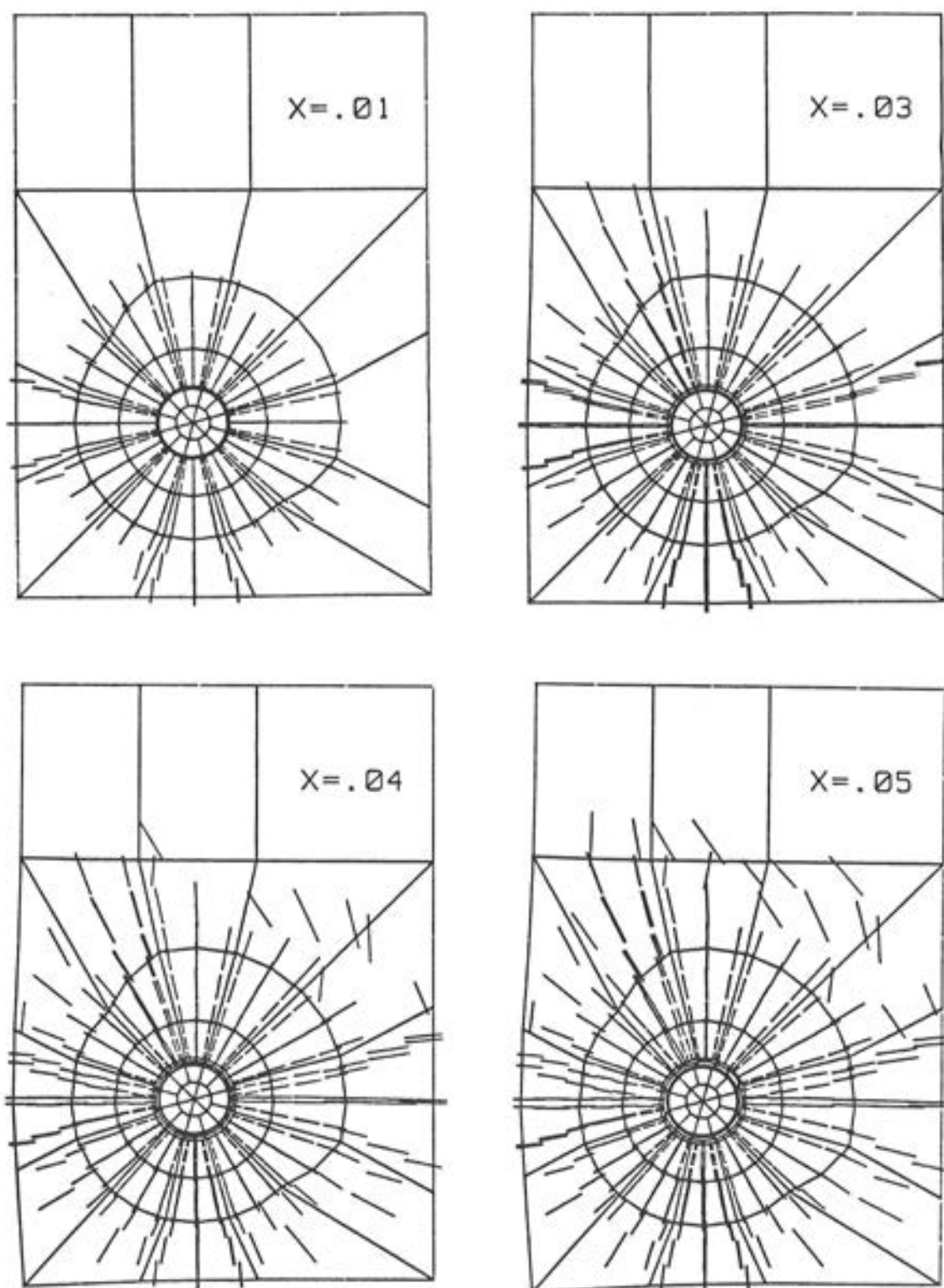


Fig. 4. Mallas deformadas y fisuración producida, para el ejemplo.

lo que permite la integración del problema utilizando, por ejemplo, el método de Newton-Raphson [5].

### EJEMPLO RESUELTO

El ejemplo resuelto se refiere a la corrosión de una barra de armadura, colocada en la esquina de un elemento de hormigón armado. Se estudia la sección transversal utilizando un modelo de elementos finitos en deformación plana (Fig. 3). El modelo se halla libre de tensiones en un principio y la corrosión se produce de manera uniforme alrededor de la barra, siendo

$$V_f/V_i = 2 \quad (17)$$

el cambio de volumen del acero cuando se corroe. Se han creado varias capas de elementos finos en la superficie de la barra, para permitir una imposición gradual de la penetración de la corrosión "x" mediante una transformación ordenada (cambio de temperatura) en dichos elementos. Las propiedades de los materiales se hallan incluidas en la Fig. 3, donde debe observarse que el acero y el óxido son un mismo material a distintas temperaturas y que el valor del coeficiente de dilatación térmica es ficticio, ya que sólo se exige la condición (11).

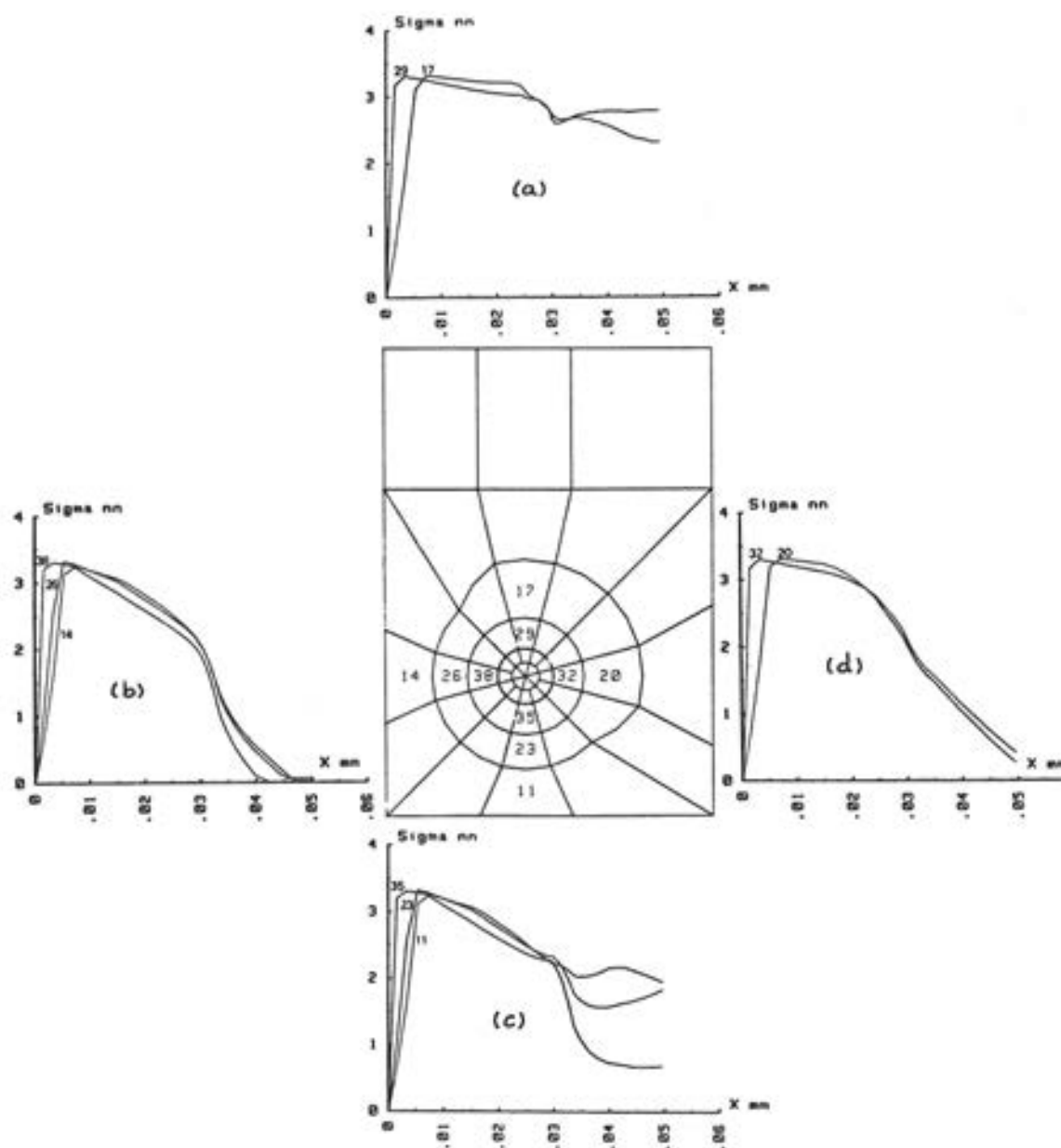


Fig. 5. Registro de las tensiones normales, para el ejemplo.

a) Elementos 29 y 17  
b) Elementos 38, 26 y 14

c) Elementos 35, 23 y 11  
d) Elementos 32 y 20

Los resultados de este ejemplo se muestran en las Figs. 4 y 5. La primera de ellas es un conjunto de mallas deformadas, para varios valores de penetración de la corrosión ( $x = .01, .03, .04$  y  $.05$  mm). En ellas aparece también la fisuración, para la que se ha utilizado, en las aperturas de fisura, el mismo factor de amplificación que el usado en los desplazamientos (amplificación = 30). Al comienzo ( $x = .01$  mm) la microfisuración se difunde partiendo de la superficie de la barra, en dirección radial y sin una zona preferencial; pero progresivamente y especialmente al final ( $x = .05$  mm) se producen macrofisuras aisladas y una porción del recubrimiento queda prácticamente desprendida.

En la figura 5 se muestra un registro de los valores de la tensión circunferencial en varios de los elementos de hormigón que rodean la barra de acero. La dirección de dicha tensión es normal a la fisuración y se anula solamente cuando la abertura de fisura alcanza su máximo en el diagrama de la Fig. 2a. Esta condición se alcanza en la macrofisura horizontal que se produce a ambos lados de la barra (Fig. 5b y d). Sin embargo, en la dirección vertical (Fig. 5a y c) no se llega a producir nunca una verdadera macrofisura y se puede apreciar incluso un incremento de la tensión normal para  $x = .03$  mm, lo que refleja la existencia de cierto cierre y reapertura de fisura (véase también Fig. 2a).

## CONCLUSIONES

El problema de la fisuración inducida por la corrosión del acero, puede ser estudiado, como cualquier otro problema de fisuración, utilizando técnicas de elementos finitos, según se ha descrito en este trabajo; y, en consecuencia, es posible usar dichas técnicas como una herramienta en la predicción de la vida de estructuras de hormigón armado sujetas a la corrosión del acero. Sin embargo, puesto que el modelo que se propone sólo cubre los aspectos mecánicos del fenómeno, necesitaría ser complementado con la información de tipo químico que permitiera establecer una relación entre la penetración de la corrosión y las condiciones ambientales.

Por otra parte, de cara a la validación del modelo propuesto, en la actualidad se están llevando a cabo una serie de ensayos de corrosión acelerada, de los que se espera poder obtener la información experimental precisa.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido realizado gracias a una colaboración entre el Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Politécnica de Madrid y el Instituto Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Es de agradecer,

especialmente, la aportación de la Dra. Andrade, de dicho Instituto, que tuvo la idea de esta colaboración y está dirigiendo los ensayos experimentales ya mencionados.

Se agradece igualmente la ayuda de investigación de la CAICYT que ha permitido financiar el trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] ROTS, J., G., BLAAWENDRAAD, J., "Crack Models for Concrete: Discrete or Smeared? Fixed, Multi-Directional or Rotating?", Heron (Delft, The Netherlands), V.34, No.1 (1989).
- [2] MOLINA, F., J., "Modeling Cracking of Concrete within the Frame of the Theory of Plasticity", Computational Plasticity II, Barcelona (1989).
- [3] ROTS, J., G., NAUTA, P., KUSTERS, G., M., A., BLAAWENDRAAD, J., "Smeared Crack Approach and Fracture Localization in Concrete", Heron (Delft, The Netherlands), V. 30, No. 1 (1985).
- [4] BAZANT, Z., P., CEDOLIN, L., "Fracture Mechanics of Reinforced Concrete", ASCE Journal of Engineering Mechanics, V.106, No.6 (1980).
- [5] BATHE, K., J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall (1982).

## RESUMEN

Se propone un modelo de elementos finitos, para el estudio de los efectos mecánicos de la corrosión del acero en el hormigón armado. Dicho modelo se basa en una imposición ordenada de la corrosión de los elementos de acero, mediante un incremento ficticio de temperatura que produce unos efectos análogos, a la vez que la fisuración del hormigón se recoge mediante un modelo conocido de fisura difusa. Se incluye un ejemplo resuelto que muestra el modo de aplicación de este modelo a problemas reales y el tipo de resultados que se pueden obtener, que se refieren especialmente al estudio de la propagación de la fisuración en función de la penetración de la corrosión en el acero.

## SUMMARY

A finite element numerical procedure is presented in order to model the response of concrete to the volume changes induced by reinforcement wear.

In order to represent the change of volume and mechanical properties a thermoelastic analogy has been implemented as well as an accurate numerical procedure to follow the evolution of the stiffness degradation. An asymmetric example is presented as well as some comments on the correspondence with experimental measurements.